

红外焦平面联合非均匀性校正算法

洪闻青 杨南生 王晓东 苏俊波 苏 兰 胡志斌

(昆明物理研究所电子与软件设计研究室, 云南 昆明 650223)

摘要 分别分析了红外焦平面阵列(IRFPA)基于定标的非均匀性校正(NUC)算法和基于场景的 NUC 算法的优势和问题。在此基础上提出了联合 NUC 算法,其中利用基于定标的两点校正法来初步消除探测器的非均匀性,然后再采用基于场景的时域高通校正法和新型自适应滤波校正法来抑制探测器非均匀性参数漂移的影响,同时减弱系统噪声对成像质量的破坏。实验结果表明,与两点法、时域高通法以及传统自适应滤波法等具有较大工程应用价值的 NUC 算法相比,联合 NUC 算法具有稳定而且性能更为优良的校正效果。

关键词 红外技术;红外焦平面阵列;联合非均匀性校正

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0611005

Combined Nonuniformity Correction Algorithm of Infrared Focal Plane Arrays

Hong Wenqing Yang Nansheng Wang Xiaodong Su Junbo Su Lan Hu Zhibin

(Laboratory for Electronics and Software Design, Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China)

Abstract The advantages and disadvantages in nonuniformity correction (NUC) algorithms based on calibration and scene of infrared focal plane arrays (IRFPA) are analysed separately. The combined NUC algorithm is presented. Two-point NUC algorithm based on calibration is adopted to remove the nonuniformity of the detector simply. The influences of detectors' NUC parameters which will change with time are weakened by using the scene-based temporal high-pass filter algorithm and new-style adaptive filter algorithm. The disadvantages for image quality introduced by noises are weakened too. The experimental results show that the combined NUC algorithm is more stable and better than some NUC algorithms with great value in project applications, such as two point NUC algorithm, temporal high-pass filter NUC algorithm and former adaptive filter NUC algorithm.

Key words infrared technology; infrared focal plane arrays; combined nonuniformity correction

OCIS codes 110.2960; 250.0040; 100.2550; 100.3008

1 引 言

随着红外成像技术的不断发展,红外焦平面阵列(IRFPA)成像系统成为了新一代红外成像系统的发展方向,较其他热成像系统具有结构简单、可靠性高、探测灵敏度和工作帧频高等优点,因而被广泛研究并且应用于国防、医疗和森林防火等各个领域^[1~6]。但是由于受到制作器件的半导体材料和工艺等条件的限制,探测器的输出响应并不相同,这就造成了 IRFPA 响应的非均匀性。因此,有效地跟

踪并去除器件的非均匀性,实现非均匀性校正(NUC)成为提高 IRFPA 成像质量的关键。

焦平面探测器的 NUC 方法有多种,大体有基于定标的校正算法和基于场景的校正算法两大类^[7]。基于定标的校正算法具有较高的校正精度,但是随着系统工作时间的增加,系统的性能会受到工作环境和系统噪声等因素的影响,之前得到的校正参数对当下的器件响应就不能起到较好的校正作用。此时就需要成像系统停止工作,重新获取校正

收稿日期: 2010-10-12; **收到修改稿日期:** 2010-12-22

作者简介: 洪闻青(1986—),男,硕士研究生,助理工程师,主要从事红外成像系统开发和图像处理等方面的研究。

E-mail: wenqing_hong@yahoo.com.cn

导师简介: 杨南生(1950—),男,研究员,主要从事红外成像系统开发和图像处理等方面的研究。

E-mail: yangnansheng@126.com

参数,因此使用范围有一定的限制。基于场景的校正算法直接利用每帧图像的场景信息进行 NUC,解决了基于定标的方法中存在的问题,但是多数算法结构相对复杂,硬件实现难度大,工程应用价值小,少数有工程应用价值的算法校正效果又不太理想。

本文提出了一种红外焦平面联合 NUC 算法。该算法综合了基于定标的校正算法和基于场景的校正算法的优势,使这两类算法取长补短,进而可以有效克服各自的缺点。该联合 NUC 算法充分发挥了定标校正算法校正精度高、结构相对简单和处理速度快的优点,用其对图像进行初步校正,然后再采用基于场景的校正算法进行校正参数的实时更新,保证自适应地跟踪探测器单元响应输出受非均匀性影响发生的漂移,从而进一步提升校正精度,增强校正算法的环境适应能力。

2 红外焦平面联合 NUC 算法

联合 NUC 算法分两步执行:1)采用两点校正法,对探测单元的原始输出进行增益和偏移量的初步校正;2)采用基于场景的联合 NUC,对 1)的校正结果进行更深层次的校正,以减弱红外成像系统随着工作时间的增加而造成的探测器响应输出发生的漂移,这里基于场景的联合 NUC 采用时域高通滤波校正与新型自适应滤波校正相联合的 NUC 方法。

2.1 两点校正法

两点校正法是较早用于红外成像系统进行 NUC 的一种方法,并且也是目前最为成熟的方法之一^[8]。该方法假设探测器的响应在所关注的温度范围内是线性变化的,同时探测器的响应具有时间的稳定性,受随机噪声的影响较小,非均匀性可以表示为乘性噪声和加性噪声作用的结果。此时,探测单元 (i,j) 的响应模型可以表示为

$$x_{i,j} = k_{i,j}\Phi_{i,j} + b_{i,j}, \quad (1)$$

式中 $\Phi_{i,j}$ 为 IRFPA 中坐标为 (i,j) 的探测单元接收到的目标场景的辐照度; $k_{i,j}$ 和 $b_{i,j}$ 分别为该单元响应的增益和偏移量; $x_{i,j}$ 为该单元对应的 $\Phi_{i,j}$ 的 IRFPA 响应输出。对于整个焦平面阵列上的每一个单元都需要进行 NUC,根据上面建立的探测器单元响应模型,其校正后的响应模型可以表述为

$$y_{i,j} = G_{i,j}x_{i,j} + O_{i,j}, \quad (2)$$

式中 $y_{i,j}$ 为的校正后探测单元响应输出, $G_{i,j}$ 和 $O_{i,j}$ 分别表示相应的增益校正参数和偏移量校正参数。为了获得 $G_{i,j}$ 和 $O_{i,j}$,需要分别用低温 T_1 和高温 T_2

均匀辐射的黑体辐照探测器,得到每个探测单元的响应输出分别为 $x_{i,j}^{T_1}$ 和 $x_{i,j}^{T_2}$,在整个焦平面上对其求各自的平均值得

$$\bar{x}^{T_1} = \sum x_{i,j}^{T_1} / N, \quad (3)$$

$$\bar{x}^{T_2} = \sum x_{i,j}^{T_2} / N, \quad (4)$$

式中 N 为整个 IRFPA 上的像元个数。 \bar{x}^{T_1} 和 \bar{x}^{T_2} 分别表示 $x_{i,j}^{T_1}$ 和 $x_{i,j}^{T_2}$ 的理想输出 $y_{i,j}^{T_1}$ 和 $y_{i,j}^{T_2}$ 的近似值。将两组数 $(x_{i,j}^{T_1}, \bar{x}^{T_1})$ 和 $(x_{i,j}^{T_2}, \bar{x}^{T_2})$ 代入(2)式,求解得

$$G_{i,j} = \frac{\bar{x}^{T_2} - \bar{x}^{T_1}}{x_{i,j}^{T_2} - x_{i,j}^{T_1}}, \quad (5)$$

$$O_{i,j} = \bar{x}^{T_1} - \frac{\bar{x}^{T_2} - \bar{x}^{T_1}}{x_{i,j}^{T_2} - x_{i,j}^{T_1}} x_{i,j}^{T_1}. \quad (6)$$

此时,获得了各单元相应的增益校正参数 $G_{i,j}$ 和偏移量校正参数 $O_{i,j}$,将 $G_{i,j}$ 和 $O_{i,j}$ 代入(2)式便可获得各探测单元校正后的输出。

2.2 基于场景的联合 NUC

在时域高通校正法中,假设探测元的增益是均匀的,在获取的序列图像帧中,场景的信息 $y_{i,j}$ 通常是高频的,而固定图案噪声是低频的,通过低通滤波器估算出图像中的低频噪声 $y'_{i,j}$,然后把含有噪声的图像帧减去估计出的低频噪声,从而获得高频的场景信息 $y''_{i,j}$,达到 NUC 的目的^[9],其表达式为

$$y''_{i,j} = y_{i,j} - y'_{i,j}. \quad (7)$$

在完成时域高通校正之后,采用新型自适应滤波校正方法。探测器单元校正后的响应模型由(2)式表示,由于整个焦平面阵列上的每一个单元都需要进行 NUC,为了表述更为简洁,这里将表示探测器单元位置的 (i,j) 略去,同时根据上面建立的探测器单元响应模型,其校正后的响应模型为

$$y_n''' = G'_n y_n'' + O'_n, \quad (8)$$

式中 y_n'' 为校正前探测单元的第 n 帧原始响应输出, y_n''' 为 y_n'' 的校正后探测单元响应输出, G'_n 和 O'_n 分别表示相应的增益校正参数和偏置校正参数。

为了获得探测单元理想输出与其校正输出之间的关系,构造两者之间的误差函数:

$$e_n = m_n - y_n''', \quad (9)$$

式中 e_n 表示探测单元理想输出与其校正输出之间的误差值, m_n 表示探测单元的理想输出^[10]。这里 m_n 可以采用邻域均值来表示。为了减弱成像系统存在的系统噪声,采用帧积分技术,即在时域中对 y_n'' 与其前面几帧进行累加之后再求得平均值 y_n'''' ,综合成像系统 NUC 更新效果考虑,累加帧数设定为 t 帧,关系式为

$$y_n'' = (y_n'' + y_{n-1}'' + \dots + y_{n-t-1}'')/t, \quad (10)$$

式中 y_{n-1}'' 表示当前帧的前一帧, y_{n-t-1}'' 表示当前帧的前面第 $t-1$ 帧。此时来自成像系统的随机噪声将被有效减弱,但是累加的帧数不能太多,否则会影响成像系统 NUC 参数的更新效果,严重时导致出现“鬼影”。探测单元理想输出与其校正输出之间的误差期望,可以表示为

$$E(e_n^2) = E[(m_n - y_n'')^2] = E[(m_n - G_n' y_n'' - O_n')^2], \quad (11)$$

根据 $E(e_n^2)$ 的梯度向量和最陡下降法,可以看到 G_n' 和 O_n' 的变化趋势:

$$E_{G_n'} = \frac{\partial E}{\partial G_n'} = 2y_n''(G_n' y_n'' + O_n' - m_n), \quad (12)$$

$$E_{O_n'} = \frac{\partial E}{\partial O_n'} = 2(G_n' y_n'' + O_n' - m_n), \quad (13)$$

通过递归得到逐帧迭代表达式^[11]:

$$G_{n+1}' = G_n' + 2\eta e_n y_n'', \quad (14)$$

$$O_{n+1}' = O_n' + 2\eta e_n, \quad (15)$$

式中 η 是调整步长的常数,控制滤波系统的稳定性和自适应收敛的速度。

在对成像系统的 NUC 参数进行更新的过程中,除去前边通过帧积分技术消除的随机噪声,系统中还留有大量系统噪声,同时在图像场景中出现的一些微小变化也会造成 NUC 参数是否需要更新的误判断,进而成像系统就会进行一些错误的校正参数更新,造成成像质量的下降。通过引入双阈值判决准则对实时获得的修正参数进行判断,决定是否需要对 NUC 参数进行更新。考虑到 IRFPA 的各个探测单元的非均匀性变化的不一致性,有的单元响应输出会比期望响应输出高,造成系统输出的场景图像比真实场景亮,严重时出现白色盲点;有的单元响应输出会比期望响应输出低,造成系统输出的

场景图像比真实场景暗,严重时会出现黑色盲点。为此,设置双阈值, d_{bright} 表示比理想响应输出高的单元的阈值,即亮单元的阈值; d_{dark} 表示比理想响应输出低的单元的阈值,即暗单元的阈值。针对亮单元,如果探测单元理想输出与其校正输出的差值小于 d_{bright} ,就对 NUC 参数进行更新,否则 NUC 参数保持不变。判决准则为如果 $e_n < d_{\text{bright}}$,则更新 NUC 参数。

针对暗单元,如果探测单元理想输出与其校正输出的差值大于 d_{dark} ,就对 NUC 参数进行更新,否则 NUC 参数保持不变。判决准则为如果 $e_n > d_{\text{dark}}$,则更新 NUC 参数。

此时,得到通过双阈值判决准则的差值关系式为

$$e_n = e_n(\omega, z) + e_n(p, q), \quad (16)$$

式中 $e_n(\omega, z)$ 和 $e_n(p, q)$ 分别表示 IRFPA 上的亮单元和暗单元。将(16)式代入(14),(15)式,经过逐帧迭代之后,便可得到收敛且最优的 G_n' 和 O_n' 值。最后,再将 G_n' 和 O_n' 代入(8)式,便可得到探测器单元响应输出的校正值 y_n''' 。

2.3 联合 NUC 算法

通过基于定标的两点校正法对探测单元的原始响应输出进行增益补偿和偏移量校正,再采用时域高通滤波校正法对上一步得到的校正结果进行校正,最后再应用新型的自适应滤波校正算法对上一步得到的校正结果进行校正。此时,整个完整的联合 NUC 校正原理如图 1 所示。其中 $x_{i,j}$ 为原始探测器单元响应输出, $y_{i,j}$ 为 $x_{i,j}$ 经过增益补偿 $G_{i,j}$ 和偏移量校正 $O_{i,j}$ 之后的单元输出, $y_{i,j}'$ 为 $y_{i,j}$ 通过低通滤波处理后得到的低频噪声, $y_{i,j}''$ 为时域高通处理后的输出, $y_{i,j}'''$ 为经过新型自适应滤波校正算法处理后的最终输出。

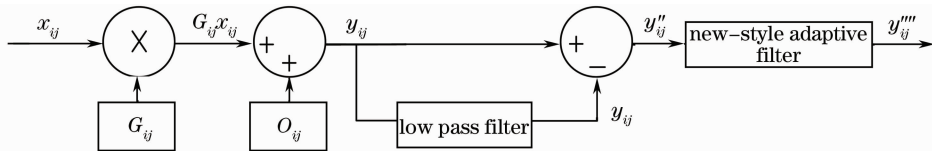


图 1 完整的联合 NUC 原理

Fig. 1 Principle of the integrated combined NUC

3 算法仿真与结果分析

应用采自 $320 \text{ pixel} \times 240 \text{ pixel}$ 中波 IRFPA 成像系统的图像序列进行算法性能实验。选取在实际工程应用中具有代表性和可行性的基于定标的两点法、基于场景的时域高通法和传统自适应滤波法与

联合 NUC 算法同时对相同图像序列进行 NUC 仿真实验。在实验中,两点法选取 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 作为定标温度,时域高通算法用到的低通滤波器为二阶巴特沃斯低通滤波器,截止频率到滤波器中心位置的距离 $d_0 = 0.5$,传统自适应滤波法和联合 NUC 算

法中用到的新型自适应滤波法的控制步长 $\eta = 0.035$, 联合 NUC 算法中帧积分的累加帧数设定为 3 frame, 亮单元阈值 $d_{\text{bright}} = 0.11583$, 暗单元阈值 $d_{\text{dark}} = 0.01928$ 。

图 2 是室温(约 20 °C)下实物场景的不同 NUC 算法校正前后的直观效果对比图。图 2(a)是未经过 NUC 的红外成像系统原始输出图像, 图像场景是一只手掌及部分手臂的红外图像, 从图中能够清楚地看到图像受到了非常严重的固定图案噪声及系统噪声的影响, 部分均匀场景有明显的明暗变化, 此外还有大量的盲点以及严重的斜纹。图 2(b)是对原始图像刚刚进行完两点校正后的图像, 原来图像中部分均匀场景的明暗变化和盲点已经被消除, 但是图中仍然有受系统噪声影响而出现的严重的斜纹。随着红外成像系统工作时间的增加(时间间隔

选为 1 h), 对系统没有重新进行定标校正, 此时从图 2(c)显示的之前经过两点校正法处理 1 h 后的图像中, 可以看到部分均匀场景区域又出现了微弱的明暗变化和盲点。图 2(d), (e)和(f)分别是采用基于场景的时域高通校正法、传统的自适应滤波校正法和联合 NUC 算法, 处理 1 h 后处理效果。图 2(d)中, 部分均匀场景区域始终存在明显的明暗变化, 还伴有系统噪声留下的相对减弱的斜纹以及很多盲点; 图 2(e)中, 同样能够看到部分均匀场景区域始终存在明显的明暗变化, 相对减弱的斜纹和为数不少的盲点; 而图 2(f)中, 原来图像中部分均匀场景的明暗变化和盲点被完全消除, 只剩下淡淡的斜纹干扰了, 说明联合 NUC 算法通过主观视觉系统观察取得了很好的校正效果。

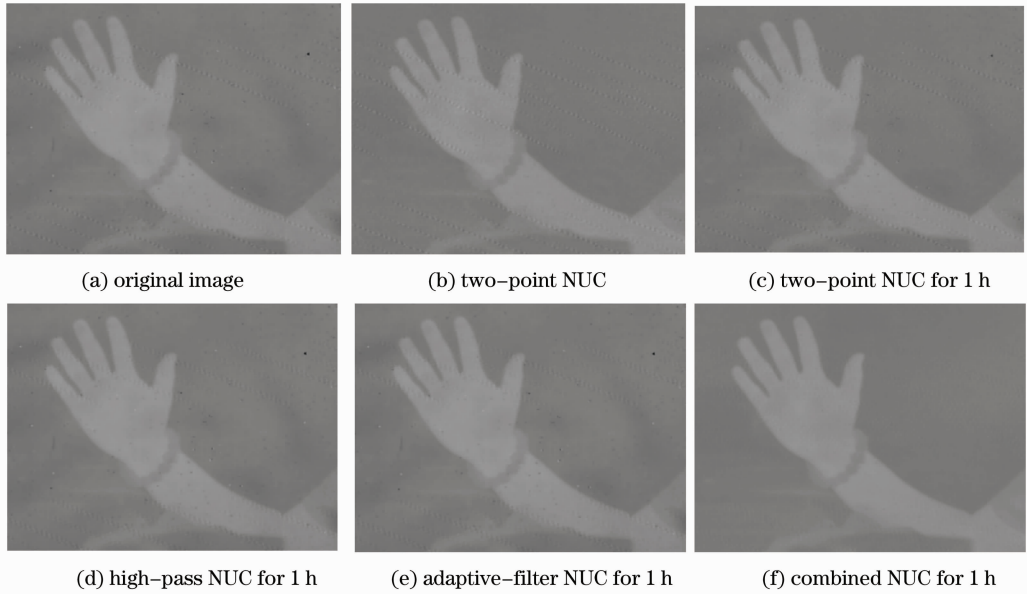


图 2 实物场景的 NUC 实验结果

Fig. 2 Experimental results of practicality scene by different NUC algorithms

为了对实验结果有一个客观的评价, 引入国际上非均匀性定义的指标 U_R ^[12]:

$$U_R = \frac{1}{y} \sqrt{\frac{1}{uv} \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v (y_{i,j} - \bar{y})^2}, \quad (17)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{uv} \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v y_{i,j}, \quad (18)$$

式中 \bar{y} 为 IRFPA 中所有探测单元的平均响应值, u 和 v 分别表示 IRFPA 中探测单元的总行数和总列数, $y_{i,j}$ 表示 IRFPA 中位置为 (i, j) 的探测单元的响应值。

图 3 是 20 °C 时均匀场景的不同算法校正前后的实验结果对比图, 图 3(a)是未经过 NUC 的红外

成像系统原始输出图像, 图像场景是黑体辐射的均匀图像, 能够清楚看到图像受到了比较严重的非均匀性及系统噪声的影响, 非均匀性 $U_R = 2.85\%$ 。图 3(b)是对原始图像刚刚进行完两点校正后的图像, 图像的非均匀性得到了有效地控制, 此时图像的 U_R 降为 1.22%, 但是发现图中仍然有受系统噪声影响而出现的明显的斜纹。随着红外成像系统工作时间的增加(时间间隔选为 1 h), 对系统没有重新进行校正, 如图 3(c)所示。此时系统性能发生了漂移, 由图 3(c)可见之前经过两点校正法处理后的图像中, 可以看到图像的质量出现了下降, 此时其 U_R 增加到了 2.00%。图 3(d)~(f)分别是采用基于场

景的时域高通校正法、传统的自适应滤波校正法和联合 NUC 法,经过相同的时间间隔的处理效果。此时经过时域高通法校正后的 U_R 维持在 2.80%,经过

传统自适应滤波校正法校正后的 U_R 维持在 2.67%,经过联合 NUC 算法校正后的 U_R 很好地维持在 0.47%。不同算法校正前后的 U_R 如表 1 所示。

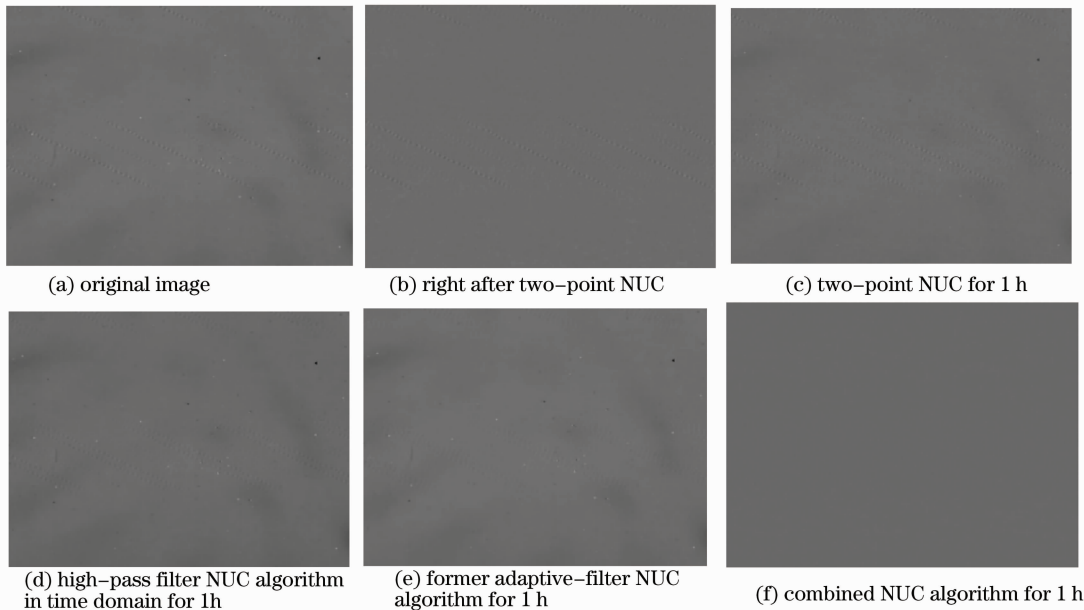


图 3 均匀场景的 NUC 实验结果

Fig. 3 Experimental results of nonuniformity correction for uniform scene 20 °C

表 1 不同算法校正前后的性能参数

Table 1 Performance parameters of real infrared images corrected by different algorithms

Parameters	Before NUC	Two-point NUC algorithm		High-pass filter	Former adaptive	Combined
				NUC algorithm	filter NUC	NUC
		After NUC immediately	After 1 h	in time domain	algorithm	algorithm
U_R	2.85%	1.22%	2.00%	After 1 h	After 1 h	After 1 h
				2.80%	2.67%	0.47%

表 1 中 U_R 客观地表明了联合 NUC 的校正效果。通过仿真实验,显示了基于定标的校正算法的缺陷,其校正性能会受工作时间的增加而下降。具有工程应用价值的基于场景的时域高通法和传统自适应滤波法,尽管能够跟随探测器响应参数的变化而对校正参数进行更新,但是校正精度始终不够理想,不能获得较好的 NUC 效果。为此,联合 NUC 算法充分发挥了基于定标的校正方法和基于场景的校正方法的优势,明显地减弱了红外图像的非均匀性和系统噪声,大幅度地提高了 NUC 的精度。在工程实现方面,联合 NUC 算法只比经典的定标校正法多了少量的乘累加运算和简单的数值比较,相比较于许多基于场景的 NUC 算法(例如卡尔曼滤波器校正、常量统计校正和最小均方误差校正等方法^[13~15]),联合 NUC 算法不需要大量的先验知识和统计数据,只需要在开机的时候做一次定标校正,

此后仅仅依靠场景信息以及几个固定常量就能完成校正参数的优化更新,并且结构相对简单,计算量小。

4 结 论

从分析基于定标的 NUC 算法和基于场景的 NUC 算法存在的问题出发,在保证算法具有工程应用价值和可实现性的前提下,提出了一种红外焦平面联合 NUC 算法。该算法充分发挥了定标校正算法校正精度高,结构相对简单,处理速度快的优点,同时又利用了基于场景的校正算法能够进行校正参数的实时更新,保证了校正方法自适应地跟踪探测器单元响应输出受非均匀性影响发生的漂移,从而进一步提升了校正精度,增强了校正算法的环境适应能力。实验结果表明,与两点校正法、时域高通滤波法和传统自适应滤波法等具有工程应用价值的

NUC算法相比,联合 NUC 算法的校后性能更好。

参 考 文 献

- 1 Zhang Hui, Zhao Baojun, Tang Linbo *et al.*. Infrared object tracking based on adaptive multi-features integration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1291~1296
张 辉, 赵保军, 唐林波等. 基于自适应多特征整合的红外目标跟踪[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1291~1296
- 2 Bai Junqi, Chen Qian, Wang Xianya. An improved high-resolution reconstruction algorithm for staring infrared image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 86~90
白俊奇, 陈 钱, 王娴雅. 一种改进的凝视红外图像分辨率重建算法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 86~90
- 3 Li Zhaohui, Wang Bing, Chen Ming. Infrared target detection based on wavelet multi scale and maximum likelihood[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3404~3408
李朝晖, 王 冰, 陈 明. 基于小波多尺度和最大似然法的红外目标探测[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3404~3408
- 4 Qian Weixian, Chen Qian, Gu Guohan *et al.*. Infrared image sharpening algorithm with noise inhibition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1807~1811
钱惟贤, 陈 钱, 顾国华等. 一种具有噪声抑制功能的红外图像锐化算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1807~1811
- 5 Luo Huan, Yu Lei, Liao Jun *et al.*. Tracking framework for small infrared multi-target in complex background[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1536~1541
罗 寰, 于 雷, 廖 俊等. 复杂背景下红外弱小多目标跟踪系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1536~1541
- 6 Lai Rui, Yang Yintang, Wang Bingjian *et al.*. S-curve model-based adaptive algorithm for nonuniformity correction in infrared focal plane arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 927~931
赖 睿, 杨银堂, 王炳键等. 一种基于S曲线模型的红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 927~931
- 7 Liu Yongjin, Zhu Hong, Zhao Yigong. Nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays based on Wiener filtering [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(7): 136~139
刘永进, 朱 红, 赵亦工. 基于维纳滤波的红外焦平面非均匀性校正算法[J]. *光电工程*, 2008, **35**(7): 136~139
- 8 A. Kumar, S. Sarkar, R. P. Agarwal. A novel algorithm and FPGA based adaptable architecture for correcting sensor non-uniformities in infrared system [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2007, **31**(6): 403~404
- 9 Yang Hu, Gao Kun, Ni Guoqiang *et al.*. Combined real-time non-uniformity correction of IRFPA based on FPGA[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(s.): 1027~1030
杨 虎, 高 昆, 倪国强等. 基于FPGA的IRFPA联合非均匀性校正的实时实现[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(s.): 1027~1030
- 10 Zhou Huixin, Bai Liping, Qin Hanlin *et al.*. Nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays based on adaptive-filter[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(11): 1611~1614
周慧鑫, 拜丽萍, 秦翰林等. 基于自适应滤波的红外焦平面阵列非均匀性校正算法[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(11): 1611~1614
- 11 R. Hart, O. Thomas. A study of non-uniformity correction methods for staring array IR detectors[C]. Edinburgh: 1st EMRS DTC Technical Conference, 2004: B8
- 12 Chinese Technique Criterion of Infrared Focal Plane Arrays Characteristic Parameters Test [S]. Chinese Standard GB/T17444-1998: 2
红外焦平面阵列特性参数测试技术规范[S]. 国标 GB/T17444-1998: 2
- 13 Zhou Huixin, Qin Hanlin, Jian Yaobo *et al.*. Improved Kalman-filter nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2008, **51**(6): 528~531
- 14 J. G. Harris, Y.-M. Chiang. Nonuniformity correction of infrared image sequences using the constant-statistics constraint [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1999, **8**(8): 1148~1151
- 15 R. C. Hardie, F. Baxley, B. Brys *et al.*. Scene-based nonuniformity correction with reduced ghosting using a gated LMS algorithm[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 14918~14933